

基于文献计量的氮化镓照明材料研究态势分析^{*}

林兴浩^{**} 张百尚 陈宇山
(广东省科学技术情报研究所, 广州 510006)

摘要:采用文献计量方法对 SCIE 文献数据库中 1990 ~ 2016 年与氮化镓(GaN)照明材料相关的科研产出进行分析,得到国内外在该领域的研究现状及趋势。通过对 GaN 照明材料领域科研活动基本特征的分析发现,发达国家在该领域的整体科研实力明显强于发展中国家,美国在多项统计指标中均占据主导地位。利用 VOSviewer 软件对文献内容进行深入挖掘,得到目前国内外在该领域的研究热点、主要产出国家/地区及机构的合作网络,以及该领域主要论文的引文情况。最后,通过对论文数、总被引数、h-index 因子、ESI 高被引论文数、高产机构和期刊等 6 项指标值进行标准化计算,对比了我国与领先国家/地区在 GaN 照明领域的科研综合竞争力,并分析了我国在该领域的科研特点,提出相关发展建议。

关键词:文献计量;氮化镓;照明;词频分析;区域竞争力

中图分类号:G321.5;G350 **文献标识码:**A **doi:**10.16507/j.issn.1006-6055.2017.08.003

Bibliometric Analysis on Research Situation of Gallium Nitride Material for LED^{*}

LIN Xinghao^{**} ZHANG Baishang CHEN Yushan

(Guangdong Institute of Scientific & Technical Information, Guangzhou 510006, China)

Abstract:Based on bibliometric method, the research outputs of gallium nitride (GaN) material for LED in SCIE database during the period of 1990-2016 are analyzed, and the research situation and development tendency in this field are shown. Firstly, it is found that the research capability of GaN-based LED in developed countries is much stronger than that in developing countries by analyzing the overall research outputs in the field. The U. S., in particular, is dominant in terms of several statistical technical indicators. Secondly, the research focus, collaborative networks of main countries/regions and institutions, citation network of representative papers in this field are also analyzed by utilizing VOSviewer software. Finally, based on the standardized calculation of six indexes (number of article outputs, total cited number, h-index factor, number of ESI highly-cited papers, high-yield organizations and journals), the comprehensive competitiveness of research capability of China is compared with that of the leading countries/regions. Meanwhile, the research characteristics of China in this field are analyzed and the development suggestions are also put forward in this article.

Key words: bibliometrics; gallium nitride; LED; word frequency analysis; regional competitiveness

1 引言

半导体材料是指导电能力介于导体及绝缘体之间、可用来制作半导体器件和集成电路的一类电子材料,目前已发展到第三代^[1]。第一代半导体材料以硅(Si)为代表,主要应用在数据计算领域,但硅基芯片传输速度较慢、功能单一,难以满足科技快速发展的技术需求^[2];第二代半导体材料以砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)为代表,主要应用在通讯领域,其制备成本昂贵、不耐高温、不宜制备高功率器

件,也难以满足新能源汽车和机器人等新兴电子科技的发展需求^[3];第三代半导体材料是以氮化镓(GaN)和碳化硅(SiC)为代表,具有较宽的禁带宽度(大于 2.2 eV),较高的击穿电场、热导率、电子饱和速率,以及更高的抗辐射能力,因而更加适合制作高温、高频、抗辐射及大功率的器件,被广泛应用于可见光照明及显示、高频微波通信、太阳能光电和电力电子等领域^[4-8]。

由于前两代半导体材料自身物理化学特性的限制已难以满足科技快速发展的技术需求,因此第三代半导体材料凭借其优异性能被业界视为是突破前两代半导体应用技术瓶颈的首选,从而受到学术界和企业界的广泛关注。上世纪 90 年初期,日本 Nichia 公司的 Nakamura 等^[9,10]科学家成功研制出可商业化的同质结及双异质结 GaN 基蓝光 LED,并

2017-05-22 收稿,2017-08-18 接受,2017-09-04 网络发表

^{*} 广东省科技计划(2017A070701005,2014B070706003)资助

^{**} 通讯作者, E-mail: linxh1988@126.com; Tel: 020-83163494

因此获得 2014 年诺贝尔物理学奖。该项成果彻底革新了光源技术,完善了 LED 红、蓝、绿三元发光色,使得更明亮节能的白光照明成为可能。由于 GaN 基 LED 具有寿命长、低能耗等特点,在可见光照明领域有着明显的竞争优势,因此,GaN 照明市场被定位为第三代半导体材料成功产业化的首个突破口^[11,12]。

目前,GaN 照明领域的研究已趋向成熟,研究热点逐渐由技术驱动转为应用驱动,主要集中在如何提高光电转化效率、增强发光品质及与其它学科领域相互融合等方面^[13]。全球各主要市场大国都加强该领域的研究,竞争格局也正在调整变化,原有的美、日、欧领先,韩、中追赶的局面将发生改变。因此,系统描述该领域的全球科研特征对我国调整研究方向,实现从“跟跑”到“并领跑”的弯道超车具有一定意义。其中,文献计量分析作为预测及分析学科发展现状、趋势的重要方法^[14],已被广泛应用于国内外科技发展趋势的分析评价^[15-17]及科技资助管理的决策参考^[18,19]。通过相关论文检索可以发现,国际上没有关于 GaN 照明领域的科学计量研究。因此,本论文对 SCIE 数据库中该领域的科研产出进行深入分析,以在一定层面上揭示目前该领域的全球研究发展趋势,并提出相关建议,为相关政府部门和科研机构对该领域的重点学科布局及研究策略制定提供信息参考。

2 数据来源和方法

本文研究的论文来源于美国科技信息研究所的 ISI Web of Knowledge 平台 SCIE 数据库。论文的检索策略主要结合了 TS 主题检索(检索范围包括文章标题、摘要和关键词)和 TI 标题检索,检索式为 TS = (" GaN" OR " gallium nitride") and TS = (" LED" or "light-emitting diode" or "light emitting" or "visible light" or "luminescence" or "lighting") not (TI = (" InGaN" or "ZnO film" or ZnO or "zinc oxide" or "magnesium oxide" or "MgO" or "NiO" or "nickel oxide" OR "CuO" or "copper oxide" or "AlN" or "aluminium nitride") not TI = (" GaN" or "gallium nitride"))。使用标题检索的作用是清洗掉研究内容为其他半导体照明材料,但在摘要中提及 GaN 而被检索到的噪音文献。检索的时间范围为 1990 ~ 2016 年,语言为 English,文献类型为 Article、Letter 和 Review,检索时间为 2017 年 4 月 15 日,共检索得

到 10977 篇论文。其中,中国大陆的统计文献包括了香港和中国澳门,中国台湾地区的文献则单独统计。

本文首先通过 ISI web of science 自带的统计分析功能,并利用 Thomson Data Analyzer (TDA)、Microsoft Excel、Origin 8.0 等软件工具对检索到的论文进行数据统计及分析,以此得到该研究领域研究现状,包括论文发表趋势、高产期刊、ESI 高被引论文、主要国家及机构等。其次,通过 VOSviewer 软件对文献内容进行深入挖掘,得到目前国内外在该领域的研究热点、主要产出国家/地区及机构的合作网络,以及该领域主要论文的引文情况。最后,通过对主要国家/地区的 6 项统计指标进行标准化计算,得到该领域的全球区域竞争力分布等信息。

3 结果与分析

3.1 全球论文总体概述

通过检索,可以得到 1990 ~ 2016 年间 SCIE 数据库共收录了 10977 篇 GaN 材料应用在可见光照明领域的研究论文,其年度发文趋势如图 1 所示。由图可知,全球在 1995 年之前收录的 GaN 照明领域论文比较少,直到 1996 年,全球发文数才首次超过 100 篇。这表明该领域在 1995 年之前仍处于探索的阶段。随着美、日等发达国家取得技术上的突破,全球逐渐加大了对该领域的研究力度,发文数在 1997 年突增到 258 篇,并在接下来的二十年整体上呈稳定上升趋势。其中,全球在 2013 年发表的论文数达到最高值(879),而在接下来几年稍微下降,维持在 800 篇左右。这表明 GaN 照明领域的研究热度在经历近二十年的迅速增长后,近几年逐渐趋向于平缓。

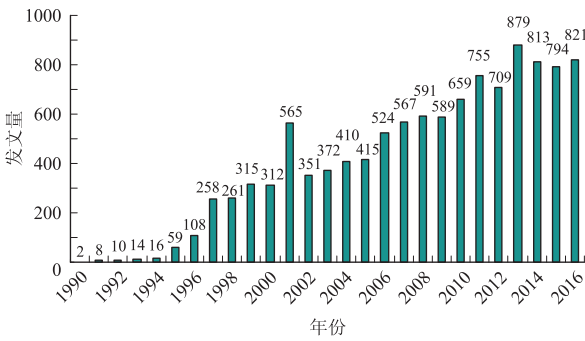


图 1 1990 ~ 2016 年全球 GaN 照明材料领域论文的年变化趋势 (基于 SCIE 数据库)

3.2 全球论文期刊分布

第三代半导体 GaN 照明材料的基础研究主要

涉及物理学、晶体学、光电学及材料学等学科领域，该领域的高产期刊也主要来自这些学科的专业期刊。全球收录该领域论文超过 200 篇的期刊如表 1 所示。其中，高产期刊中有五个来自美国，各有一个来自荷兰、日本和德国。

表 1 GaN 照明领域的高产期刊

序号	期刊	论文数/篇 (比例)	影响 因子	国家
1	<i>Applied Physics Letters</i> (应用物理快报)	1511(13.77%)	3.14	美国
2	<i>Journal of Applied Physics</i> (应用物理杂志)	769(7.01%)	2.10	美国
3	<i>Journal of Crystal Growth</i> (晶体生长杂志)	653(5.95%)	1.46	荷兰
4	<i>Japanese Journal of Applied Physics</i> (日本应用物理杂志)	315(2.97%)	1.12	日本
5	<i>IEEE Photonics Technology Letters</i> (IEEE 光电子技术快报)	248(2.26%)	1.95	美国
6	<i>Optics Express</i> (光学快报)	245(2.23%)	3.15	美国
7	<i>Physical Review B</i> (物理评论 B 辑)	242(2.21%)	3.72	美国
8	<i>Physical Status Solidi A</i> (固体物理 A 辑)	214(1.95%)	1.65	德国

3.3 ESI 高被引论文

通过统计 SCIE 数据库中的 ESI 高被引论文，得到 GaN 照明领域近十年内发表的被引次数排在该领域全球前 1% 的论文共有 89 篇。图 2 给出了 ESI 高被引论文不低于 3 篇的国家/地区详情。其中，全球共有 5 个国家的 ESI 高被引论文超过 5 篇。其中，美国以 33 篇高被引论文位于全球首位，中国大陆和日本分别以 9 篇和 7 篇论文分列二、三位。随后，韩国和英国同以 6 篇论文并列第四。表 2 给出了该领域被引数超过 350 次、具有代表性的高被引论文。从研究主题角度分析，主要的高被引论文集中在该领域的发展综述及器件效率变化的机理性研究。从论文产出地分析，虽然中国大陆高被引论文的数量排在第二，但并没有产生具有代表性的高被引论文，被引数较多的代表性论文主要来自美国、英国和韩国。

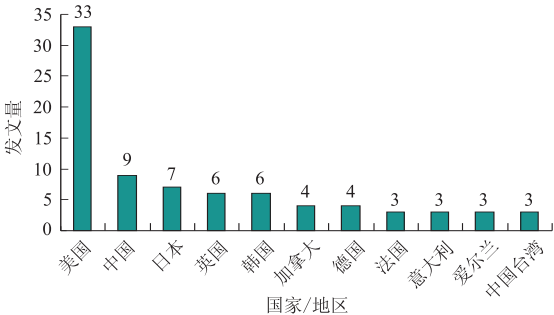


图 2 GaN 照明材料领域 ESI 高被引论文不低于 3 篇的国家/地区

表 2 GaN 照明领域具有代表性的 ESI 高被引论文

序号	论文研究主题	被引数	第一作者	国家
1	GaN 基 LED 发光效率衰减的机理研究 ^[20]	780	Kim, Min-Ho	韩国
2	氮化镓半导体室温声子极化研究 ^[21]	518	Christopoulos, S.	英国
3	三族氮化物在固态照明领域的应用前景 ^[22]	467	Wu, Junqiao	美国
4	X 射线衍射在三族氮化物半导体结构及器件的表征应用研究 ^[23]	384	Moram, M. A.	英国
5	GaN 等固态照明材料的发光性能研究现状及发展趋势 ^[24]	373	Crawford, Mary H.	美国
6	GaN 基照明材料内部量子效率随着注入电流增加而衰减的机理研究 ^[25]	367	Joachim Piprek	美国
7	三族氮化物在紫外发光二极管应用研究 ^[26]	367	Khan, Asif	美国

3.4 全球主要产出国家/地区

SCIE 数据库收录的科技论文数量是衡量一个国家或地区科研实力的重要指标之一。以国家/地区为关键检索词对收录的 10977 篇论文进行检索统计，共有 17 个国家/地区的发文量超过 100 篇(图 3)。其中，中国大陆的论文发表总数排名世界第二(1902, 占世界发表论文总数的 17.33%)。发表论文最多的国家是美国(2622, 23.89%)。另外，排名三到十七位的国家/地区依次是韩国(1526)、中国台湾(1406)、日本(929)、德国(518)、俄罗斯(438)、英国(377)、波兰(244)、印度(207)、意大利(194)、瑞典(174)、新加坡(164)、苏格兰(159)、西班牙(147)和加拿大(112)。

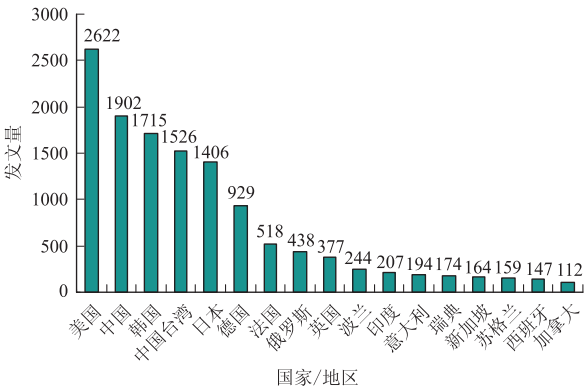


图 3 1990 ~ 2016 年 GaN 照明材料领域发文超过 100 篇的国家/地区

为了更好地比较主要国家/地区的论文发表情况，图 4 对比了排名前六位国家/地区在 1990 ~ 2016 年间的年发文量变化趋势。从图中可以看到，1995 年后，美国、日本和德国在该领域率先取得突破，发文量快速增加。其中，美国在前期一直表现出明显优势，而日本和德国的发展略有起伏。其他国

家/地区如中国大陆、韩国和中国台湾地区在前期表现出较为缓慢的发展趋势。到了后期,中国大陆由于政府加强了政策支持和科研资金的投入,在该领域得到快速发展,年发文量迅速增长,在 2011 年首次超过美国,并在之后一直保持全球领先的地位。

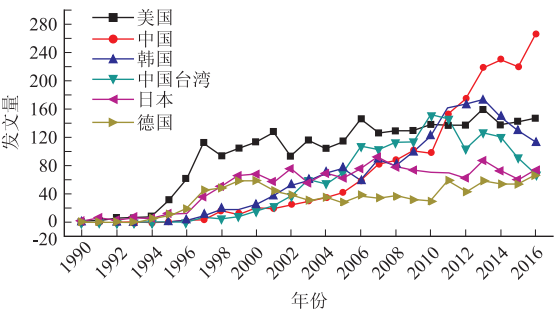


图 4 1990 ~ 2016 年主要国家 GaN 照明材料领域发文数的年变化趋势

论文总被引次数和 h-index 因子是衡量地区已发表论文整体水平的重要指标之一。虽然中国大陆总发文量位于全球第二,但总被引用次数及 h-index 因子在全球六个主要论文产出国家/地区中均排在最后。这表明我国的发文量虽然较之前有很大增长,但整体质量仍有待提高。美国在这两个指标均表现出强大的实力,遥遥领先于其他国家;另外,日本虽然总发文量仅排在全球第五,但其总被引次数和 h-index 因子均位于全球第二位,表明其研究内容被引用较多、具有前沿性,在一定程度上反映了该领域的研究发展趋势。美国和日本表现出明显的基础研究优势为这两个国家在该领域产业界领先全球提供了扎实的技术支撑。

表 3 1990 ~ 2016 年发文量超过 100 篇的国家/地区

序号	国家	总发文量	占全球发文量的比例	总被引次数	h-index 因子
1	美国	2622	23.89%	102461	139
2	中国大陆	1902	17.33%	18517	50
3	韩国	1715	15.62%	25124	65
4	中国台湾	1526	13.90%	23505	66
5	日本	1406	12.81%	37071	86
6	德国	929	8.46%	23363	68

3.5 国内外主要机构分布

3.5.1 全球主要机构分布

根据统计结果可知,全球共有 15 家机构在 GaN 照明领域发文数大于 200 篇,如图 5 所示。美国(加州大学系统、能源部和国防部)、中国台湾(台湾成功大学、台湾交通大学、台湾大学和台湾中央大学)、韩国(全北大学、高丽大学、三星和光州科学技术院)各占据了 4 家机构,表现出比较强的整体科研实力。另外,俄罗斯占据了两家机构(俄罗斯科

学院和约飞物理技术研究院),法国(法国国家科学院)和中国大陆(中国科学院)各占有一家机构。虽然中国大陆仅有一家机构进入排名,但其以发表 572 篇论文领先其他机构,位于全球首位。

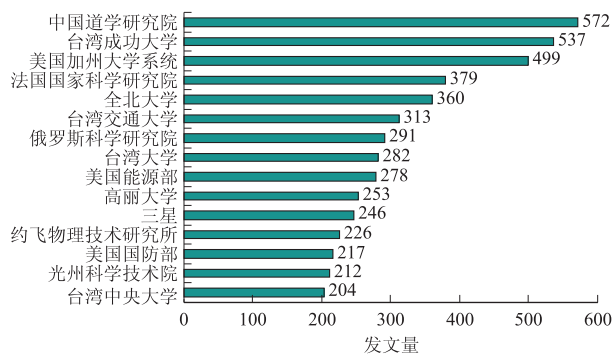


图 5 全球发文量大于 200 篇的核心机构

3.5.2 中国大陆主要机构分布

对中国大陆主要研究机构进行论文数统计,得到共 12 家机构在 GaN 照明领域发文数超过 50 篇,进入全球一百强(表 4)。其中,中国科学院由于包括了下属多个研究所,在发文量上表现出比较强的综合实力,以 572 篇论文遥遥领先国内其他机构,并排在全球首位。同时,北京大学和南京大学分别以发表 175 篇和 100 篇论文排在国内第二、三位,位于全球前五十强。

表 4 中国大陆主要机构发文数

序号	机构	发文量 / 篇	占国内总发文量的比例/%	全球排名
1	中国科学院	572	30.07%	1
2	北京大学	175	9.20%	17
3	南京大学	100	5.26%	41
4	厦门大学	76	4.00%	61
5	山东大学	75	3.94%	62
6	中山大学	69	3.63%	73
7	华南师范大学	67	3.52%	77
8	清华大学	65	3.42%	82
9	香港科技大学	63	3.31%	86
10	吉林大学	63	3.31%	86
11	华中科技大学	62	3.26%	91
12	香港大学	62	3.26%	91

3.6 研究热点

主题关键词是论文作者最想向读者传达的信息,体现了文献研究的核心内容,通过统计论文的主题关键词在文献标题、摘要和关键词中出现的频率,可以直观看出该领域的研究热点及发展趋势。本文利用 VOSviewer 软件分别对全球 10977 篇论文和中国大陆 1902 篇论文的主题关键词进行深入挖掘,并利用软件自带算法对主题关键词进行聚类,得到如图 6 所示的全球及我国大陆在该领域的研究热点。图中圆环的大小代表了主题关键词出现的频率,圆

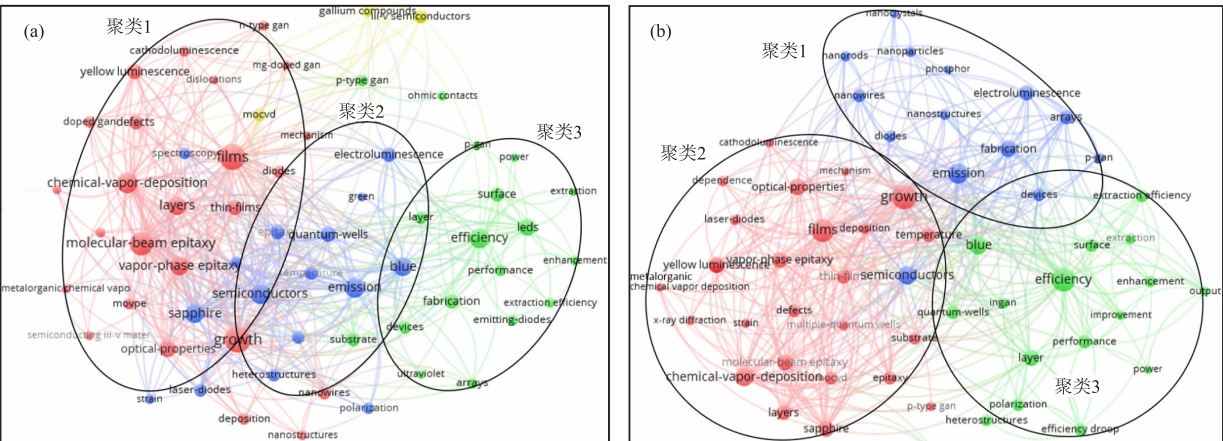


图 6 (a) 全球和 (b) 中国大陆在 GaN 照明领域研究热点聚类图

表 5 全球及我国主要研究热点及高频关键词	
主要高频关键词	研究热点
全球	晶体外延生长方法优化
	量子阱蓝光和绿光 LED 场致发光效率研究
	器件发光效率的优化
中国大陆	晶体外延生长方法优化
	晶体纳米形貌的可控生长
	器件发光效率优化及衰减机理研究

环之间距离的远近则代表了主题关键词之间关联性的强弱程度。

通过对 GaN 照明领域文献的高频关键词进行聚类分析,对比国内外在该领域的研究热点(表 6)可知,晶体外延生长方法优化以及器件发光效率优化是国内外在该领域共同重点关注的研究热点。应特别注意的是,晶体纳米形貌的可控生长及器件效率衰减的机理研究也是中国大陆科学家重点关注的研究热点方向,而全世界范围则更加关注量子阱蓝光和绿光 LED 的场致发光效率研究。该结果表明,

表 6 全球主要国家/地区及机构合作情况	
主要国家/地区	聚类 1 中国大陆、中国台湾、新加坡、加拿大
	聚类 2 德国、英国、西班牙、苏格兰、波兰、法国、意大利
	聚类 3 美国、日本、韩国、印度、瑞典、俄罗斯
主要机构	聚类 1 中国科学院、北京大学、法国国家科学院、德国保罗·柯克固态电子学研究所、波兰科学院、英国剑桥大学、英国斯克莱德大学
	聚类 2 台湾中央大学、台湾成功大学、台湾中央大学、台湾交通大学、台湾大学、圣塔芭芭拉加州大学
	聚类 3 瑞典林雪平大学、日本名城大学、日本名古屋大学
	聚类 4 韩国全北大学、韩国光州科学技术院、韩国汉阳大学、韩国高丽大学、美国北卡罗来纳州立大学、美国佛罗里达大学、美国伦斯勒理工学院、美国桑迪亚国家实验室、日本东北大学、俄罗斯科学院

中国大陆在该领域的研究现状仍处于追赶地位, GaN 晶体的制备仍是研究重点,而国外主流发达国家的研究重点则更侧重于器件效率的提升。另外,利用 VOSviewer 软件对高频关键词出现的平均时间进行统计分析,得到器件发光效率优化的高频关键词平均出现时间要晚于其他研究热点的高频关键词,表明该研究方向是 GaN 照明领域目前重要的发展趋势。

3.7 全球主要国家/地区及机构合作网络

为了分析 GaN 照明领域的全球区域及机构合作情况,本文使用 VOSviewer 软件的 Co-authorship 功能分析了该领域发文量超过 100 篇的主要国家/地区及机构的合作网络图,如图 7 所示,各个分析原点的大小及距离代表了分析本体的发文量及其之间的合作紧密度。表 6 给出了该领域主要产出区域及机构的主要合作聚类情况。由主要国家/地区合作网络可以看到,中国大陆与中国台湾、新加坡及加拿大合作比较紧密,而欧洲各主要产出国家如德国、英国和西班牙等因为地域相近因素原因而合作相对紧密。同时,美国由于在该领域技术处于领先地位,与其他国家/地区均保持一定合作关系,位于整个合作网络的中间,但与日本、韩国、印度、瑞典及俄罗斯的合作相对更加紧密些。另外,由全球该领域主要高产机构的合作网络可以得到呈现以下几个特征:一是我国高产机构(中国科学院与北京大学)和欧洲主要高产机构合作更为紧密,二是中国台湾地区的高产机构之间开展了比较密切的合作,三是美国、日本韩国及俄罗斯等国家的高产机构交流相对比较多。值得一提的是,该领域一些高产机构如美国国防部、能源部及韩国三星等可能因为涉密等原因与其他机构的合作并不密切,因此并未被软件统计到

合作网络中。

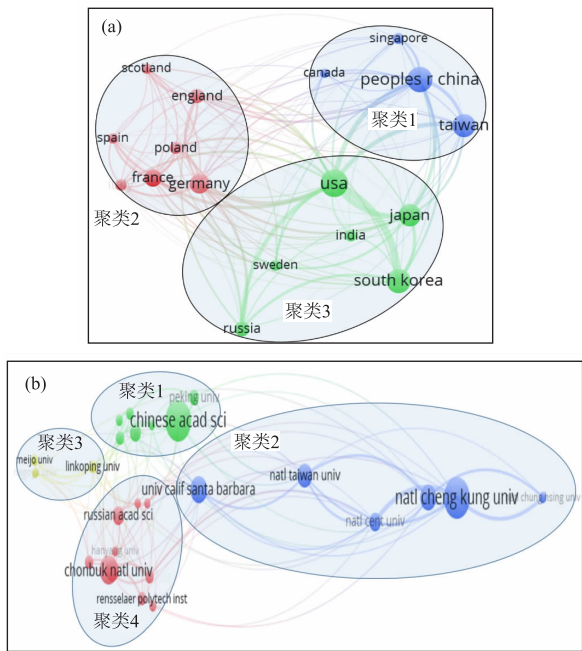


图 7 全球 GaN 照明领域发文数超过 100 篇的主要国家/地区 (a) 及机构 (b) 合作网络图

3.8 全球主要论文的引文分析

通过分析该领域全球主要论文的引文情况,可以得到该领域的研究发展情况,如图 8 所示。为了保证分析文献的代表性,利用软件分析时考虑了论文的引用频数及其与其它论文的相关性两个参数。通过深入分析主要论文内容及其相互间的引文情况,发现该领域的发展主要有以下几个特征:一是日本科学家 Nakamura 最早开启该领域的研究,在 1991 年发表了首次实现 GaN 在 LED 领域应用的论文^[9]。随后,Strite^[27]发表了综述文章,系统总结了各种氮化物 AN(A = Ga、Al、In)及其合金的晶体生长制备、晶体结构及光电子性质,由此开启全球在该领域的广泛研究。二是 20 世纪 90 年代的代表性论文主要研究内容是通过优化材料生长方法来提高器件效率,表明该时期全球科学家主要关注 GaN 晶体生长方法的探索及优化。到了 21 世纪,代表性论文的内容主要关注影响 GaN 发光效率的深层次机理研究,表明此时科学家的关注重点已经由材料的生长转向器件性能优化。三是该领域主要论文产出主要集中在日本、美国及欧盟等发达国家和地区,表明这些国家和地区目前强大的产业实力是早期技术壁垒设置及长期技术积累而形成的,而这也是目前我国在该领域落后于他们的重要原因之一。

3.9 地区竞争力分析

为了分析全球 GaN 照明领域的区域科研竞争

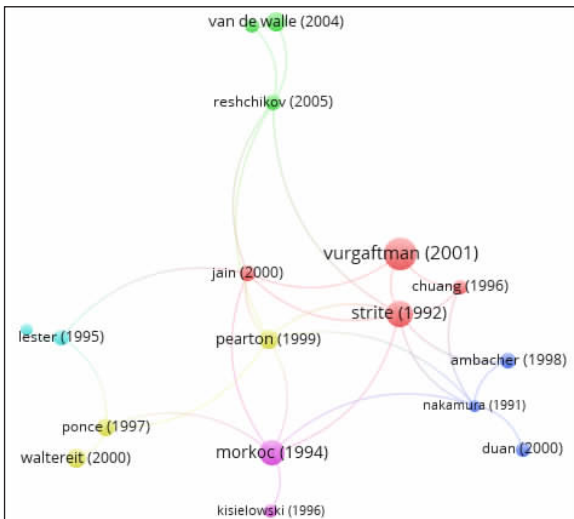


图 8 全球 GaN 主要论文引文情况

力水平及我国大陆在该领域所处的地位,本文筛选发文章、总被引数、h-index 因子、ESI 高被引论文数、高产机构数(TOP 50)和高产期刊数(TOP 50)6 个指标来评价国家/地区在该领域的科研综合竞争力(表 7)。通过标准分统计方法计算出各个国家/地区在各项指标上的标准分,并通过相加各项指标的得分得到各个国家/地区的科研综合竞争力。每个国家的各指标标准分计算公式如下:

$$A_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sqrt{\frac{\sum_i (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{T}}} \tag{1}$$

其中, A_{ij} 代表第 i 个国家在第 j 个指标的标准分, x_{ij} 代表第 i 个国家在第 j 个指标的数值, $\bar{x}_j$ 代表所有国家在第 j 个指标的平均值, T 代表国家总数, A_i 代表第 i 个国家的综合得分。

通过对比各主要国家在 GaN 照明领域的科研水平,可以得到以下几个特点:首先,美国在该领域的科研水平处于绝对领先地位,6 项指标均位于全球领先地位,并表现出较为明显的优势。其次,日本虽然发文章量仅排在全球第五,但其在其它 5 项指标均表现出强大实力,综合竞争力仅次于美国排在第二。需要特别指出的是,日本论文的总被引数及 h-index 因子均远高于发文章量更多的韩国、中国大陆和中国台湾,表明日本在该领域的研究成果受到科学家们更多的关注,在一定程度上代表了该领域的研究热点。最后,其余四个国家在该领域的科研水平各有侧重点,但也都有需待提高的方面。韩国和中国台湾在高产期刊数量上较为薄弱,而在其它方面实力较为平均;德国的发文章量较少,但其 h-index 因

子指标值较强;中国大陆的发文量和 ESI 高被引论文数排在全球第二,表明在该领域具备了一定的科研规模和实力,但论文总被引数和 h-index 因子均落后其它领先国家/地区,说明中国大陆目前产生能引起其他科学家关注的原始创新性研究成果仍然较少,这可能是中国大陆与其它领先国家在该领域仍存在一定差距的一个重要原因。

表 7 第三代半导体 GaN 照明领域的区域科研综合竞争力分析

指标	参数	美国	日本	韩国	中国大陆	中国台湾	德国
发文量	x_{i1}	2622	1406	1715	1902	1526	929
	A_{i1}	4.695	2.015	2.569	2.904	2.230	1.662
总被引数	x_{i2}	102461	37071	25124	18517	23505	23363
	A_{i2}	6.101	1.967	1.211	0.794	1.109	1.100
h-index 因子	x_{i3}	139	86	65	50	66	68
	A_{i3}	4.603	2.492	1.655	1.057	1.694	1.775
ESI 高被引论文数	x_{i4}	33	7	6	9	3	4
	A_{i4}	6.248	1.031	0.831	1.433	0.229	0.429
高产机构数	x_{i5}	15	5	7	4	8	3
	A_{i5}	5.435	1.449	2.174	1.087	2.536	0.725
高产期刊数	x_{i6}	21	6	1	2	0	4
	A_{i6}	6.098	1.524	0	0.305	-0.305	0.915
综合指标	A_i	33.180	10.478	8.440	7.580	7.493	6.606

4 结论

利用科学的文献计量方法对已发表论文数进行统计分析,可以直观地了解到该学科领域的发展现状、机构布局、研究热点及区域科研竞争力水平等信息。本论文通过对 1990 ~ 2016 年间 ISI Web of Knowledge 平台 SCIE 数据库收录的全球 GaN 照明领域研究论文进行统计分析,可得到以下几点结论:

1)全球 GaN 照明领域在经历 20 世纪 90 年代初期的探索期后,在 90 年代中后期开始进入快速发展阶段,1997 年至今在整体上呈现出快速稳定的增长趋势。其中,发达国家在该领域的整体实力明显强于发展中国家,美国占据主导地位,在多项指标如论文数、总被引数、高产期刊和高产机构等均领先全球,具有明显的优势。

中国大陆 1990 ~ 2016 年间在该领域发表的研究论文总数位于全球第二,2012 ~ 2016 的年发文量稳居世界第一,在其它各项指标方面也不断拉近与领先国家的差距。这个现象表明,在国家近几年的政策和资金大力支持下,我国在该领域的基础研究取得了显著进步。

2)利用 VOSviewer 软件对 GaN 照明领域论文的主题心关键词进行词频分析,发现该领域国内外

的研究前沿主要集中在晶体外延生长及器件效率优化等方向。其中,中国大陆目前更侧重于 GaN 晶体的制备,而国外主流发达国家则更侧重于器件效率的优化,这表明我国在该领域的研究现状仍处于追赶地位。通过分析该领域主要高产国家/地区及机构合作网络,得到中国大陆、中国台湾地区与欧盟合作相对紧密,而美国、日本及韩国等行业强国相互之间的合作比较多。通过分析代表性论文的引文情况,得到该领域主要论文产出主要集中在日本、美国及欧盟等发达国家和地区,表明这些国家和地区在该领域研究具有长期的技术积累,从而形成目前强大的产业实力。

3)通过对比中国大陆与领先国家/地区在 GaN 照明领域的科研综合竞争力水平可以发现,虽然中国大陆目前在该领域已具备了一定的科研规模和实力,但论文总被引数及 h-index 因子要远小于其他领先国家/地区,说明中国大陆在该领域具有原创性的研究成果相对较少。这可能是中国大陆在该领域整体科研水平落后于其他国家/地区的重要因素之一。

结合以上结论,我国在 GaN 照明领域的发展应注意以下几点:

1)加强该领域前沿热点研究。通过政策和资金整合国内科研资源及优势,并加强内部专业人才的培养和海外高层次人才的引进,突出国内重点研发方向,在该领域若干前沿热点建立具有较强研发能力和创新能力的研究团队进行重点技术攻关,以此拉近与领先国家/地区的差距,并最终实现弯道超车。

2)制定灵活的科研人员考核机制。在鼓励科研人员提升该领域科研成果数量时,也应该要注重提升成果质量,力争发表一些高水平、高被引的科研成果,提高我国在该领域的国际影响力,推动我国在该领域的基础研究迈上新台阶。

3)加强该领域研究成果的转化及应用。通过建立高效合理的产学研合作计划积极推动该领域研究人员与企业的合作,让研究人员积极参与到该领域产业化急需攻关的研究课题上,形成具有产业化意义的应用研究成果,并突破国外对我国在该领域产业应用的技术封锁。

参考文献

[1]李春,邓君楷.第三代半导体产业概况剖析[J].集成电路应用,2017,34(2):87-90.

- [2] 陈兴章. 国内外硅半导体材料产业现状及发展[J]. 上海有色金属, 2013, 34(3): 93-99.
- [3] 时翔, 张超. 毫米波化合物半导体材料研究进展[J]. 电子元件与材料, 2016, 35(12): 12-16.
- [4] PENGELLY R S, WOOD S M, MILLIGAN J W, et al. A review of GaN on SiC high electron-mobility power transistors and MMICs[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(6): 1764-1783.
- [5] WANG C M, WANG X L, HU G X, et al. The effect of AlN growth time on the electrical properties of $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ HEMT structures[J]. Journal of Crystal Growth, 2006, 289(2): 415-418.
- [6] 张进城, 郝跃, 赵天绪, 等. SiC 新型半导体器件及其应用[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2002, 29(2): 157-162.
- [7] 任孟德, 秦建新, 王金亮, 等. GaN 材料的应用及研究进展[J]. 超硬材料工程, 2013, 25(4): 34-38.
- [8] MORKOÇ H, STRITE S, GAO G B. Large-band-gap SiC, III-V nitride, and II-VI ZnSe-based semiconductor device technologies[J]. Journal of Applied Physics, 1994, 76(3): 1363-1398.
- [9] NAKAMURA S, MUKAI T, SENOH M. High-power GaN P-N junction blue-light-emitting diodes[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1991, 30(12A): L1998-L2001.
- [10] NAKAMURA S, SENOH M, MUKAI T. P-GaN/N-InGaN/N-GaN Double-Heterostructure Blue-Light-Emitting Diodes[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1993, 32(2): L8-L11.
- [11] JIMI H, INADA T, FUJIWARA K. Temperature - dependent electroluminescence intensity in green and blue (In,Ga)N multiple-quantum-well diodes[J]. Physica Status Solidi-Rapid Research Letters, 2008, 2(2): 50-52.
- [12] 雷通, 王小平, 王丽军. 第三代半导体材料在 LED 产业中的发展和应用[J]. 材料导报, 2009, 23(1): 7-11.
- [13] 国家半导体照明工程研发及产业联盟产业研究院. 2016 年中国半导体照明产业发展白皮书[R]. 北京: 中国半导体照明协会, 2016.
- [14] 王鑫, 史静, 肖仙桃, 等. 国内地质学研究领域学科发展热点与态势分析[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 1144-1150.
- [15] 黄可, 李印结, 孤峰, 等. 基于文献计量的我国及世界光电材料研究比较分析[J]. 世界科技研究与发展, 2016, 28(5): 264-270.
- [16] 陈华, 杨阳, 王伟. 基于文献计量的全球山地生态学研究态势分析[J]. 世界科技研究与发展, 2017, 39(4): 372-379.
- [17] 黄鲁成, 王静静, 李欣, 等. 基于文献计量的新兴趋势分析[J]. 情报学报, 2015, 34(7): 58-64.
- [18] LEYDESDORFF L. Indicators of Innovation in a Knowledge-based Economy[EB/OL]. 2013. https://www.researchgate.net/publication/28090942_Indicators_of_Innovation_in_a_Knowledge-based_Economy.
- [19] PENDLEBURY D A. White Paper: Using Bibliometrics in Evaluating Research[EB/OL]. 2008, http://isiwebofknowledge.com/media/pdf/UsingBibliometricsinEval_WP.pdf.
- [20] KIM M H, SCHUBERT M F, DAI Q et al. Origin of efficiency droop in GaN-based light-emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(18): 183507.
- [21] CHRISTOPOULOS S, VON HOGERTHAL G, BALDASSARRI H, et al. Room-temperature polariton lasing in semiconductor microcavities[J]. Physical Review Letters, 2007, 98(12): 126405.
- [22] WU Junqiao. When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106(1): 011101.
- [23] MORAM M A, VICKERS M E. X-ray diffraction of III-nitrides[J]. Reports on Progress in Physics, 2009, 72(3): 036502.
- [24] CRAWFORD M H. LEDs for Solid-State Lighting: Performance Challenges and Recent Advances[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 14(4): 1028-1040.
- [25] PIPREK J. Efficiency droop in nitride-based light-emitting diodes[J]. Physica Status Solidi A-Applications and Materials, 2010, 207(10): 2217-2225.
- [26] KHAN A, BALAKRISHNAN K, KATONA T. Ultraviolet light-emitting diodes based on group three nitrides[J]. Nature Photonics, 2008(2): 77-84.
- [27] STRITE S, MORKOÇ H. GaN, AlN, and InN: A review[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 1992, 10(4): 1237-1266.